

学位論文要旨


氏名

武田 俊 

論文題目

「電流誘導磁気変調分光法を用いた非接触心肺機能監視術」

指導教授承認印

熊谷 寛 

電流誘導磁気変調分光法を用いた非接触心肺機能監視術

DM-18018 武田 俊

[序論] 近年、特に COVID-19 の世界的パンデミックに伴って、自宅やホテル等で療養する患者が増加している。病床確保の面などで利点も多いが、在宅療養中の病態管理や特に急変の察知が難しく、必要な治療を受けられないまま手遅れとなるケースも散見される。しかし、一般に院内で使われる生体情報モニタ等は拘束性が高く使用・管理に専門知識が必要で、在宅で利用することは困難である。これに対し、患者や家族自身で扱えるような簡易監視装置があれば在宅管理において有効であると考えられる。特に心肺機能は患者の生命に直結するため有効性が高いと考えられる。現在、心機能については、スマートウォッチに代表されるような光電脈波計が利用されているが、接触式であるため感染等のリスクを持つうえ、腕時計を常用しない患者の場合特に身体・心理面で負担となる。呼吸機能監視にはパルスオキシメーターが用いられているが、これも接触式であるうえ、酸素飽和度は生体の代償機構などの存在によってほとんど変化しないため、これに異常がみられる時点ですでにかなり重症化しているケースも多い。したがって呼吸そのものを監視することがより重要である。非接触で呼吸や脈拍を測定する技術は、例えばミリ波・マイクロ波レーダーや映像脈波などが提案されているが、体動に弱い、測定条件が厳しく制限される、プライバシーの問題など課題も多く実用には至っていない。これに対し電気インピーダンス分光法(EIS :Electrical Impedance Spectroscopy)を提案する。これは、体組成計のように生体へ微小な電流を印加し、それによって生じる電位から生体インピーダンスを求め、その時間変動から呼吸や脈拍を推定するものである。前述の手法に比べ体動に強く、高周波の電流を利用することで衣服の上からなど直接の接触がなくとも計測が可能であるが、生体-センサー間の接触インピーダンスに強く影響を受けるため、より遠距離の測定は困難である。これに対しさらに、電流誘導磁気変調分光法(CIMMS :Current-Induced Magnetic Modulation Spectroscopy)を提案する。EIS と同様に微小電流を印加し、この電流によって生じる誘導磁場を計測することで生体インピーダンスを求め、時間変動から呼吸や脈拍を推定する技術である。生体および空気の透磁率は真空中の透磁率にほぼ等しいため、センサー-生体間の空気層による影響を最小限とすることができ、より離れた状況において測定が可能である。非接触 CIMMS の実現には高周波電流を使う必要があり、そのため高周波かつ高感度な磁気センサを必要とする。申請者は、光ポンピング原子磁気センサ(OPM :Optically-Pumped Atomic Magnetometer)が適すると考える。これは、アルカリ金属蒸気に対し特定の光を入射すると、アルカリ金属・磁気・光三者間の相互作用により透過光の偏光・強度などが磁気関数として変化することを利用したセンサである。OPM は理論上超電導量子干渉磁束計を上回る感度を極低温なしに実現可能であり、周波数応答も原子運動によるためほぼ DC~GHz におよぶ広い範囲に対応可能である。OPM による超高感度磁気計測は厳重な磁気シールドなどの存在を前提としているが、CIMMS で予想される数百 kHz、100pTp-p 程度、周波数・位相が単一かつ既知という測定条件であれば、より簡便に測定可能なシステムも構築可能であると予想される。

[目的] そこで本論では、OPM-CIMMS による非接触心肺機能監視装置の開発を目的とし、非磁気シールドで動作可能な高周波 OPM の開発、OPM-CIMMS の実証、および OPM-CIMMS による換気回数・脈拍数測定の可能性の検討を行った。

[非磁気シールドで動作可能な高周波 OPM の開発] 本論では、内寸 4mm 立方の ^{87}Rb 蒸気セルを用いた OPM の構築を行った。光源には 795nm 単一周波数半導体レーザーを用い、光源とその制御系、セル、その他の光学素子、および受光素子が同一の筐体に収め、これと受光回路、位相同期ループ(Phase-Locked Loop)回路を含む全測定系が 20cm 四方に収まる OPM システムを作成した。PLL 回路よりドライブ電流を駆出しする。そして、それによって生じる磁場を OPM で計測し、その信号を PLL 回路内で離散フーリエ変換を行い得られた絶対値振幅を読み出すことで印加周波数における磁気強度を見積もった。感度評価のために参照磁場源(10mH 巻線インダクタ)へ電流を印加し測定したところ、20~225kHz の範囲において $1.9\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ 以下の最小分解能を有することを確認した。これは 100pTp-p 程度と予想される CIMMS での発生磁場より十分に細かく、要求性能を充足しているといえる。

[OPM-CIMMS の実証] OPM システムの付近に、正負の平板電極をそれぞれ Rb セルから 10cm の位置で一直線上になる様に設置し、そこへ PLL 回路の駆動電流を接続し空気中へ電流を印加した。この時、セル上方および正電極上方の軸上に試料(水 400mL)を設置し、その時の磁気強度変化を取得した。結果として、セル上方の軸上では-5%程度、電極上方では+25%程度の磁気強度変化を得られた。水は誘電体であり空気に比べインピーダンスが小さく電流が集中する。セル上に設置した際には水のほうへと引き寄せられることでセル部の電流およびそこから誘導される磁気強度が下がったと考えられる。また、電極上方は電気力線が集中しており、そこに低インピーダンスの物体があることで電気力線が大きく変化、結果としてセル部の電流および誘導磁気が強まったと考えられる。これらは理論上予想されたとおりのふるまいであり、この OPM-CIMMS システムは空気-水のインピーダンス変化を検知可能であると示された。

[OPM-CIMMS による換気回数・脈拍数測定の可能性の検討] この OPM-CIMMS を生体インピーダンス計測に用いることで心肺機能が検知可能であるかの検討を行う。ペースメーカー等生体インプラントを持たない健常成を実験対象者とする。仰臥位において胸部上方に電流印加電極および OPM を設置し、これを用いて胸部インピーダンスの経時変化を推定する。これらをオフライン処理することで分時換気回数および脈拍数を推定する。そして、同時に羽根車式フローセンサおよびベルト心電計を用いて計測された真値との比較を行い、OPM-CIMMS システムが換気回数、脈拍数を推定可能であるか、およびその精度の評価を行う。本実験は島根大学医学部医学研究倫理委員会の審査中である。

[結語] 本論では、患者の在宅管理等において簡便かつ非接触で呼吸・脈拍情報の監視装置の開発を目的とし、OPM を用いた CIMMS 測定システムの開発を行った。結果として、磁気シールド等大掛かりな設備なしに動作可能な OPM 装置を開発し、これを用いた CIMMS システムにおいて空気-水間のインピーダンス変化を測定可能であることを示した。現在生体被検者を対象に換気回数及び脈拍数が測定可能であるかの検証が進行中である。